第46卷　第8期
2023年8月

干旱区地理
ARID　LAND　GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 8
Aug.　2023

兰州市主城区路网形态对城市活力的影响分析

卢　北[1]，　曾俊伟[1]，　钱勇生[1]，　魏谞婷[1]，　杨民安[2]，　李海军[1]

（1. 兰州交通大学交通运输学院，甘肃　兰州　730070；2. 兰州交通大学建筑与城市规划学院，甘肃　兰州　730070）

摘　要：便捷发达的交通有利于提升城市活力，从而促进城市的高质量发展。为深入挖掘城市活力变化机理，以兰州市主城区为例，基于路网形态和地理大数据，使用空间设计网络分析方法和地理加权回归模型分析路网对城市活力的影响。结果表明：(1) 城市活力随着路网向外逐渐降低，变化规律与路网接近度呈现高度一致性。(2) 在提升兰州市主城区城市活力方面，穿行度作用较为微弱，但有利于发挥兰州市在兰西城市群中的联通作用。(3) 街道和城区的衔接处和边缘接近度较高，黄河两岸城市活力值受地理限制存在较强的差异性。(4) 路网形态布局合理的地区往往会吸引更多的商业和服务活动，具有更大的市场潜力和更多的经济机会。研究结果可以明确路网形态对城市活力的影响，为兰州市主城区提升城市活力提供参考，有助于促进城市活力的提升。

关 键 词：路网形态；城市活力；路网拓扑结构；地理加权回归模型；空间设计网络分析；空间异质性

文章编号：1000－6060(2023)08－1333－11(1333～1343)

20世纪中期，国外学者对城市活力的概念和影响因素进行探究，Row等[1]认为城市活力是城市诱导社会和经济活动更加活跃的能力；Lynch[2]将城市活力描述为场所形式满足人类生活要求的能力大小；Montgomery[3-4]提出城市活力由活跃程度、交互和多样性构成，并考虑到文化、人口规模和建筑对城市活力的影响；Sung等[5]制定了一系列定量指标验证城市活力的多样性理论。进入21世纪后，城市活力相关研究主要集中在诸如停车限制政策[6]、公共绿地[7]、城市形态[8]、社会活动的多样化[9]等影响因素的探索。国内学者对城市活力的研究起步较晚。在研究方法上，因子分析法[10]在初期的应用较广，随后刘黎等[11]将模糊物元法引入城市活力评价，还有学者从经济、社会、文化、环境等角度构建城市活力评价指标体系[12]。多元线性回归方法[13]、TOPSIS算法[14]、K-means聚类[15]、空间设计分析方法[16]、地理探测器[17]、地理加权回归模型[18]等逐渐应用于城市活力的研究。在研究内容上，早期研究侧重于在空间和城市设计方面对城市经济活力和城市竞争力的含义[10]进行探讨，在此基础上，越来越多学者对城市活力的影响因素进行深入的探究，例如街道可达性、建筑密度和形态[19]以及建成环境[17]等。近年来，研究人员应用兴趣点[15]、基于位置的社交媒体签到数据[20]、移动互联网数据[21]等大数据来表征实时人口密度、城市功能区、交通特性[17]、空间交互潜能[14]，丰富了街道可达性[16]、空间结构[22]等对城市活力影响的研究。

国内外研究人员将交通特性、街道可达性纳入城市活力影响因素的分析，明确了交通网络形态与城市活力的相关性。而以往研究往往将交通作为城市活力的一部分进行探究，未针对路网形态对城市活力的影响机制进行深入探讨，且路网结构分析大多采用单一的可达性[23]计算，将街道指标和城市活力联系起来的研究相对较为缺乏。空间设计网

收稿日期：2022-09-08；　**修订日期：**2022-12-17

基金项目：甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目(GSSYLXM-04)；甘肃省哲学社会科学规划项目(2021YB058)；甘肃省高等学校创新基金项目(2020B-113)；国家社科基金一般项目(15BJY037)；中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)资助

作者简介：卢北(1997-)，女，硕士研究生，主要从事交通运输规划与管理等方面的研究. E-mail: lubei0825@163.com

通讯作者：钱勇生(1970-)，男，教授，主要从事交通运输规划与管理、安全技术与工程研究等方面的研究. E-mail: qianyongsheng@mail.lzjtu.cn

络分析(Spatial design network analysis, sDNA)从拓扑学视角出发,可以凸显交通网络结构的内在特征,该模型自开发以来在交通网络对城市活力的影响探索中运用仍然较少,有较大的应用空间。兰州市作为中国西北部的重要省会和兰西城市群节点城市,6条铁路的经过确立了其不可或缺的交通枢纽地位。兰州市在"一带一路"倡议、《西部陆海新通道总体规划》战略格局中也起到重要联通作用。2020年兰州市建立了骨架路线网络系统,基本上形成了覆盖中心城区和横跨黄河的街道网络。因此本文以兰州市为例,基于sDNA模型和地理加权回归模型计算路网拓扑结构指标,分析城市路网形态和城市活力的时空变化情况,并探讨路网形态对城市活力影响的空间异质性和作用机制。

1　研究区概况

兰州市地理位置介于102°36′~104°35′E、35°34′~37°00′N之间,为甘肃省省会城市,是工业、交通以及丝绸之路经济带的核心城市。现辖5区(城关区、七里河区、西固区、安宁区、红古区)和3县(永登县、榆中县、皋兰县)以及兰州新区,市区面积1631.6 km²。黄河穿城而过,流经市域150.7 km,其中城区47.5 km。相比其他区域,中心城区人口较多,城市化水平较高,资源集中,交通网络发达,其城市活力与周边地区相比具有明显差别,本文选取兰州市中心城区的49个街道作为研究对象(图1)。

2　数据与方法

2.1　数据来源与预处理

本文使用的路网数据来源于国家基础地理信息中心,城市活力值基于百度热力图计算,百度热力图解决了以往传统研究中样本容量有限的问题,可以更加有效的表征城市活力。通过Python编程语言构建ArcGIS模型工具箱获取百度热力图,从而获得研究区域内为期1周的热力图栅格数据,抓取时间间隔为1 h,空间分辨率为200 m×200 m。POI、交通站点、线路数据来源于高德地图,人口密度数据来自兰州市统计局发布的统计年鉴,建筑土地利用数据来源于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(DOI: 10.11769)。

2.2　模型构建与变量选取

2.2.1　空间设计网络分析　比尔·希列尔将空间看作实现社会经济、文化目标的方式并创立了空间句法。而sDNA模型更加强调城市网络和交通系统的整合和协同性[20]。在度量方式上,采用"角度+距离"的混合度量方式,可以更好地反应实际交通区位;在算法上,更加成熟和严谨,也更加贴近实际路网形态[15]。英国卡迪夫大学依托GIS平台研发了

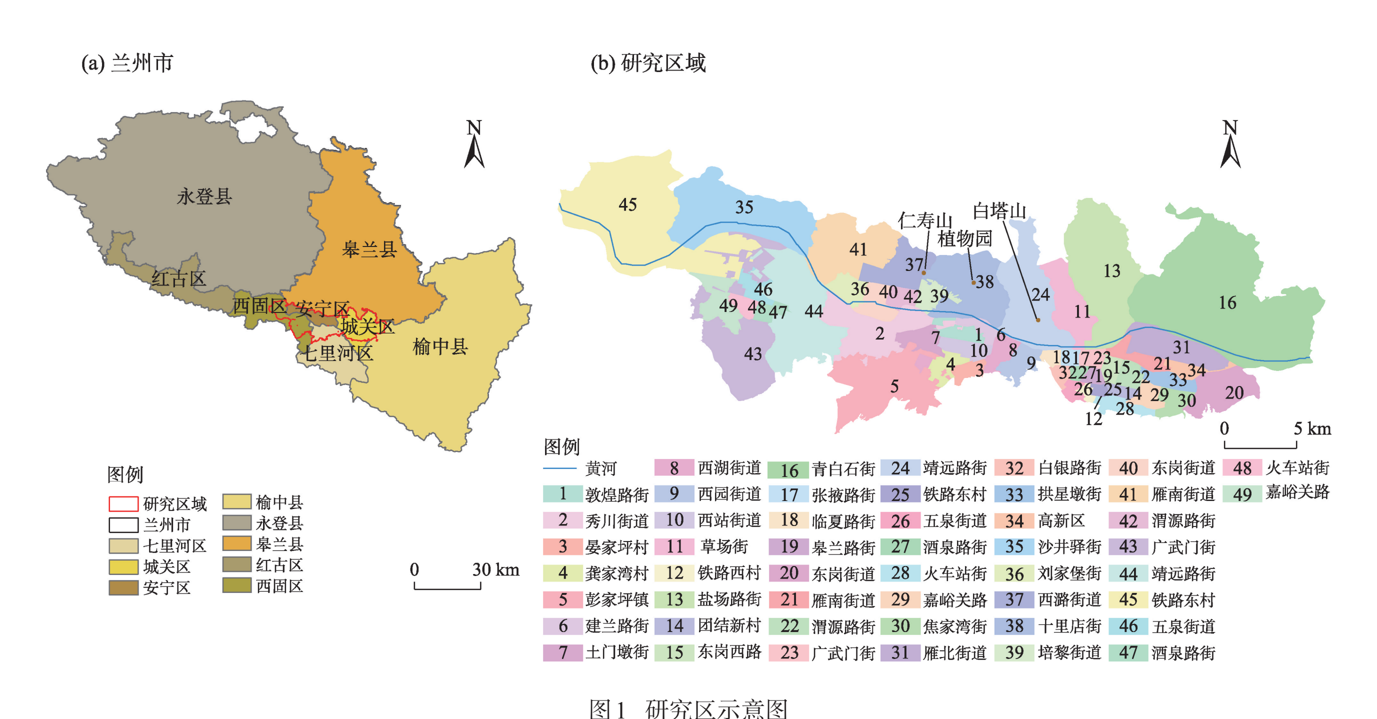


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the research area

sDNA软件，运算速度较快且稳定性较强。采用由"节点"和"边"组成的经典拓扑方式[24]，以道路为边，交叉口为节点。本文应用sDNA模型计算得出以下指标表征路网拓扑结构。

（1）接近度

接近度同时考虑了交通网络权重的数量和可达性，代表某道路到搜索半径(*R*)范围内其他路网的难易程度[17]，接近度越高，拓扑整合能力和中心性越好，区域内的交通流更趋向于经过此处[16]。计算公式为：

$$\mathrm{NQPDE}(x)=\sum_{y\in R_x}\frac{\left[W(y)P(y)\right]^{\mathrm{nqpdn}}}{d_{\mathrm{E}}(x,y)^{\mathrm{nqpdd}}} \tag{1}$$

式中：$\mathrm{NQPDE}(x)$为由欧几里得度量方法定义最短距离的接近度；$W(y)$为路网的权重；$P(y)$为搜索半径内节点y的权重；nqpdn和nqpdd默认值为1；R_x为由x出发的网络半径中多条线路集合；$d_{\mathrm{E}}(x,y)^{\mathrm{nqpdd}}$为欧几里得度量下原点$x$与目的地$y$之间的最短拓扑距离。

（2）穿行度

与接近度不同，穿行度将起始权重分布在目的地权重上，表达路网被搜索半径内交通流通过的可能性，穿行度越高代表某路网在更多交通流的最短路径上，承载着更多的交通量。计算公式为：

$$\mathrm{TPBtE}(x)=\sum_{y\in N}\sum_{z\in R_y}\mathrm{OD}(y,z,x)\frac{W(y)P(y)}{\mathrm{total\ weight}(y)} \tag{2}$$

$$\mathrm{OD}(y,z,x)=\begin{cases}1, & x\text{位于}y\text{到}z\text{的最短路径上}\\ \frac{1}{2}, & x\equiv y\neq z\\ \frac{1}{2}, & x\neq y\equiv z\\ \frac{1}{3}, & x\equiv y\equiv z\\ 0, & \text{其他情况}\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\mathrm{TPBtE}(x)$为由欧几里得度量方法定义最短距离的穿行度；N为系统中的线路集合；R_y为由y出发的网络半径中多条线路集合；$\mathrm{OD}(y,z,x)$为搜索半径R内节点x通过节点y与z之间最短拓扑路径；$\mathrm{total\ weight}(y)$为每个节点$y$在搜索半径$R$内的节点总数。

2.2.2　城市活力评价　关于城市活力内涵的研究不断丰富，既有成果均提到了人与场所的相互作用是城市活力的核心。人的活动使城市具有生命力，人的聚集特征是城市活力的表现。百度热力图通过不同的颜色和亮度等级显示连续的时间跨度和不同区域人口聚集度变化的图像数据[25]，弥补了传统城市研究的不足，被认为是空间活力最有效的动态表达之一[26]。

本文基于百度实时热力图，对城市活力值进行计算，根据颜色分为7个等级，等级越高，城市活力越强。计算公式为：

$$V=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_i}{n},\quad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中：V为研究区域内城市活力的大小；n为栅格数；V_i为第i个栅格的活力值。

2.2.3　回归分析

（1）解释变量的选取

为研究路网相关影响因素对城市活力的作用，分别从路网总体规模、公共交通服务水平、路网拓扑结构、其他交通相关影响因素出发选取解释变量。路网长度反应交通网络的规模，由于兰州市地铁线路较少，所以采用公交相关指标体现城市公共交通服务水平。接近度和穿行度反映路网的拓扑结构，兴趣点(Point of interest，POI)可有效表征经济和社会生活在空间上的分布特征。建筑密度和土地利用情况分别从吸引人群能力和持续性吸引人群方面影响城市活力。综上，选取如表1所示的解释变量。

表1　解释变量及方差膨胀系数

Tab. 1　Explanatory variable and VIF

选取依据	解释变量	方差膨胀系数
路网总体规模	路网长度	2.12
公共交通服务水平	公交路网长度	8.98
	公交路线段数	11.10
	公交站点数量	3.85
路网拓扑结构	接近度	2.25
	穿行度	1.12
其他交通相关影响因素	经济POI	3.50
	社会POI	4.96
	人口密度	1.58
	建筑面积	1.19
	土地利用	1.22

为消除量纲影响，对解释变量进行标准化处理，并采用方差膨胀系数(Variance inflation factor，VIF)检验解释变量之间的多重共线性，剔除VIF>

7.5[27]的变量。计算公式为：

$$Y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \tag{5}$$

式中：Y_i 为被解释变量；β_0 为线性回归方程的截距；β_k 为第 k 个自变量的回归系数；X_{ik} 为自变量；ε_i 为随机误差项。

路网形态即交通网络形态，接近度与穿行度表征路网拓扑结构，根据研究区域内出行特点，结合已有研究，设置800 m、1200 m、10000 m和无限远(n)为计算尺度进行计算，并选取800 m、1200 m及 n 计算路网局部特征和全局特征。

在地理信息系统中，POI是地理对象抽象的点，包含各类产业和基础设施点位情况，可以反映人口和产业分布情况，进而体现城市活力的分布[28]。根据高德地图制定的标准，将研究区域内POI分为两类，如表2所示。

表2 POI的分类

Tab. 2 Classification of POI

POI类型	类别	名称
经济POI	消费	购物消费
		餐饮美食
		汽车相关
	生产	公司企业
社会POI	社会生活	科教文化
		商务住宅
		休闲娱乐
		生活服务
		交通设施
		医疗保健
		酒店住宿
		运动健身
		金融机构
		旅游景点
		其他

(2) OLS和GWR模型

在回归分析中，普通线性回归模型默认变量间具有同质性，忽略了变量间的局部特征。普通最小二乘法(Ordinary least squares，OLS)在多数情况下适用，但是空间数据总是存在异质性和空间自相关，违背了OLS回归的使用原则。而地理加权回归模型(Geographically weighted regression，GWR)局部空间自相关模型可以反映空间数据的异质性特征，是定量研究空间非稳定性的有效方法[29]。它在研究区域的每处产生描述局部关系的回归模型，从而探索特定尺度下的局部空间关系及相关驱动因素[30]。应用计算得出路网形态指标和城市活力值，对解释变量和被解释变量进行回归分析。

先后利用OLS和GWR模型，以城市活力相关研究为依据，探究兰州市中心城区涵盖路网形态指标在内的解释变量与城市活力之间的联系。GWR模型将数据的地理位置纳入回归参数中，同时考虑了空间权重，计算公式为：

$$Y_i = \beta_0(u_i + v_i) + \sum_k \beta_k(u_i + v_i)X_{ik} + \varepsilon_i \tag{6}$$

式中：Y_i 为 i 单元的城市活力指数；(u_i,v_i) 为 i 单元的空间位置；$\beta_0(u_i + v_i)$ 为模型回归截距；$\beta_k(u_i + v_i)$ 为解释变量的回归系数；X_{ik} 为 i 单元上的第 k 个解释变量；ε_i 为随机误差。

$$\beta_k(u_i + v_i) = \left[X^{\mathrm{T}} W(u_i + v_i) X\right]^{-1} X^{\mathrm{T}} W(u_i + v_i) Y \tag{7}$$

式中：$W(u_i + v_i)$ 为空间权重矩阵；X、Y 分别为解释变量和被解释变量矩阵；X^{T} 为 X 的转置矩阵。以某工作日和休息日的最高活力值进行OLS分析，得到2个OLS模型，进行地理加权回归分析得到2个GWR模型。多个回归模型中，值小的模型更优。

3 结果与分析

3.1 城市交通网络结构分析

基于ArcGIS安装sDNA工具箱，计算接近度和穿行度。比较不同尺度下计算结果，选取800 m、1200 m为分析路网局部特征的半径，无限远(n)为全局特征的半径，结果如图2所示。

由图2可以看出在局部尺度和全局尺度上，城关区的酒泉路街道、东岗西路街道等5个街道为接近度的核心，具有较强的中心性和可达性，承载着较大的交通量。七里河区的西湖街道、靖远路街等几个街道和其他区出现几点高接近度，总体以城关区的几个街道为核心发散开来，呈点式扩散，零散的点多见于街道和城区的衔接处或边缘，说明这些街道无论是在局部尺度还是全局尺度上，更容易去往其他地区。随着搜索半径从800 m增长至1200 m，接近度等级处于1~4级的街道数目减少，穿行度也呈现出相似的趋势，在一定范围内，随着搜索半径增大，可达性和街道可通过性稍有减弱，全局尺度

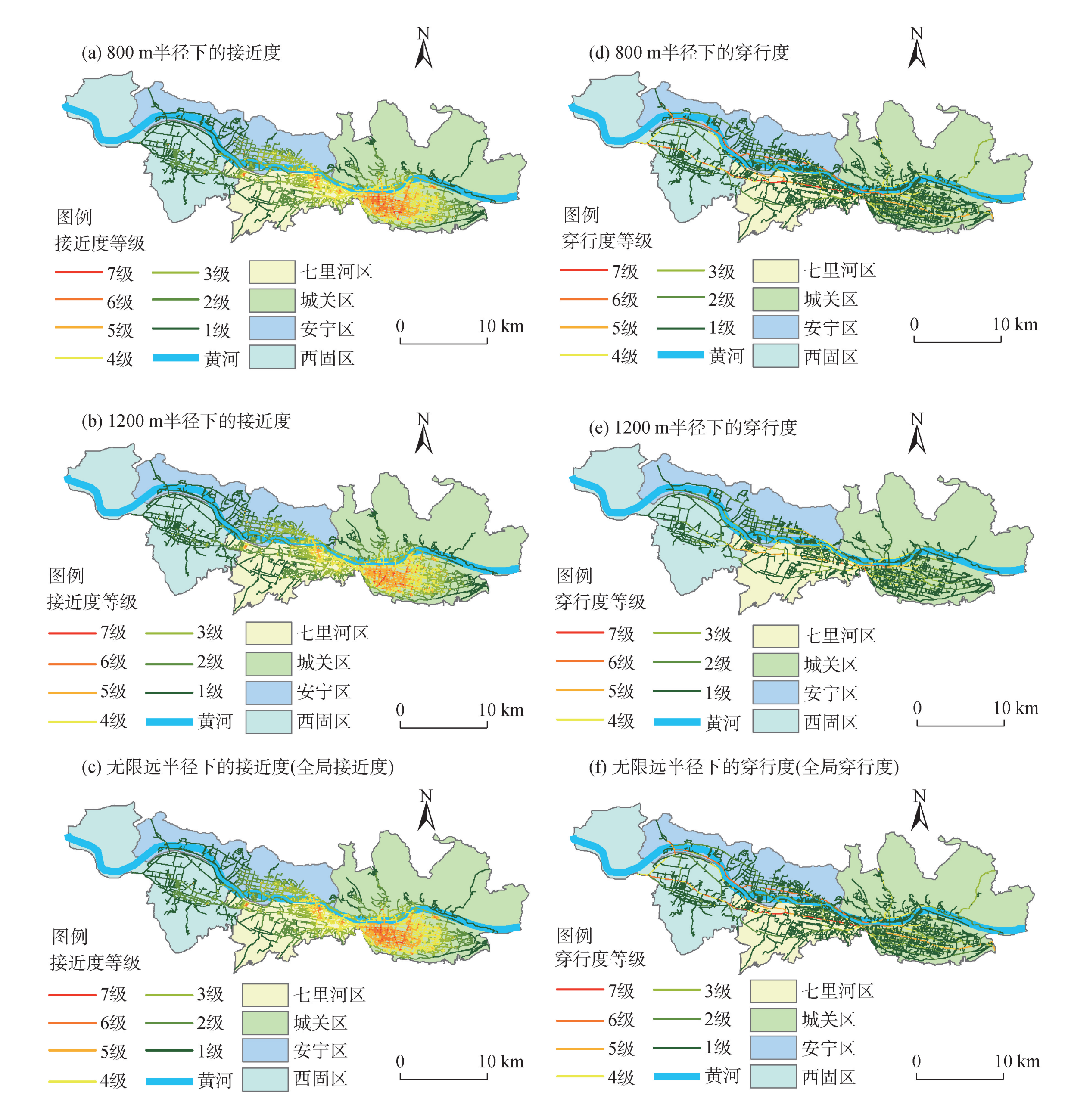


图2　研究区内路网拓扑结构指标空间格局

Fig. 2　Spatial pattern of road network topological structure index in the study area

上的接近度与局部接近度差异并不大，说明路网在一定半径范围内具有较好的可达性。在研究区域面积较小的情况下，路网的拓扑结构以局部尺度为主。

城关区内穿行度较高的路段较多，跨区路段的近城关区段穿行度更高，与接近度一致，研究区域内穿城而过的两条路穿行度最高，但在不同行政区域内表现不尽相同，在研究区域内中间地理位置的七里河区和安宁区表现相对较好。随着搜索半径扩展到1200 m，穿行度处于最高等级的路网数量减少到0，道路通过性下降。总体穿行度核心仍位于城关区中路网最为密集的几个街道。

研究区域内路网拓扑结构总体呈发散式，中心位于城关区的酒泉路街道、东岗西路街道等，接近度从城关区向外呈零星点式扩散，穿行度沿着贯穿研究区域的路网向外逐渐降低。

3.2　城市活力时空分布

3.2.1　城市活力的时间分布特征　为了探究路网结构对城市活力的影响，进一步对城市活力的时空分布特征进行分析。应用GIS软件中的栅格计算器对

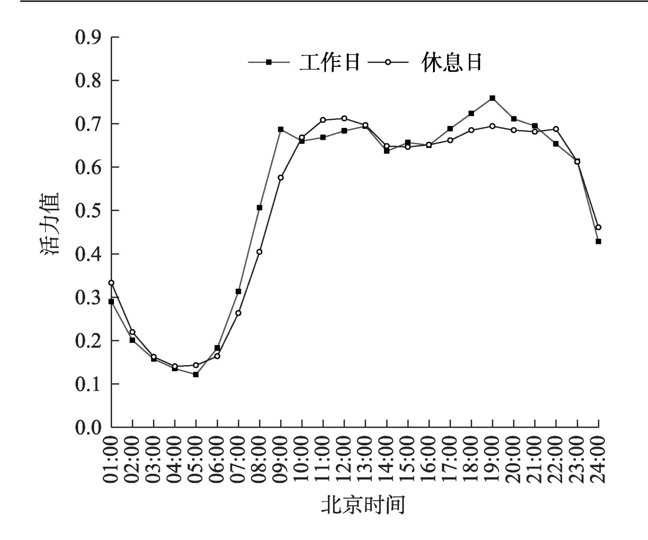


图3 工作日和休息日城市活力时序性变化

Fig. 3 Temporal changes of urban vitality on working days and rest days

城市活力值进行计算。图3显示了城市活力的时序性变化情况，城市活力的变化趋势符合人们日常上下班的作息。工作日和休息日的区别主要在于：工作日的城市活力值在早上7:00活力值骤增，晚上21:00之后活力值逐渐下降。在早高峰时段7:00—9:00，活力值变化幅度最大，增长最为迅猛，可以看出随着人们开始外出工作，活力值显著增加。在9:00—12:00，活力值较为稳定，没有大幅变化，12:00—14:00活力值稍有下降，表明中午人们活动强度并不大。在下午18:00，活力值达到顶峰，随后逐渐下降，到23:00之后活力值逐渐下降并且趋于稳定，城市活力在工作日通常于早上6:00开始恢复。

3.2.2 城市活力的空间分布特征 根据城市活力值的时间变化趋势，分别选取工作日和休息日中活力值最高和最低的时间点绘制城市活力空间分布图（图4）。

观察城市活力工作日和休息日的最高活力值空间分布可知，研究区域城市活力空间分布总体呈中心向周围发散趋势，核心为城关区和七里河区，侧重于城关区，从空间分布来看，变化趋势和路网接近度高度一致，即使在1 d中城市最为静谧的时

(a) 工作日5:00城市活力分布

(b) 工作日19:00城市活力分布

(c) 休息日4:00城市活力分布

(d) 休息日12:00城市活力分布

图4 城市活力空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of urban vitality

刻，较高活力值的分布仍然与较高接近度路网分布一致。说明路网的接近度在很大程度上决定着城市活力的分布。对比工作日和休息日的城市活力分布情况，安宁区的变化最大，从工作日到休息日，安宁区的城市活力值下降最为明显，尤其是附近的仁寿山、长寿山、植物园等，休息日活力显著上升，类似情况还有城关区的白塔山公园等休闲娱乐场所。从整体来看，无论是工作日还是休息日，沿穿行度较高的几条路线周围，城市活力值相对较高。黄河两岸城市活力值相差较大，这种情况在城关区体现尤为明显。

4 模型总体分析

4.1 OLS和GWR模型分析

通过对路网拓扑结构指标的计算和对城市活力的时空分布特征分析，可以发现接近度和穿行度的高低值分布与城市活力值的分布存在较高的一致性。为了进一步分析路网结构对城市活力的影响，以城市活力为被解释变量进行回归分析。

表3所示的OLS和GWR模型回归分析结果显示，OLS回归结果Koenker（BP）统计量显著，表示解释变量对被解释变量的影响存在空间异质性，并且分别以工作日和休息日的城市活力值为被解释变量GWR模型的矫正拟合优度约为0.80，相比OLS模型赤池信息准则（Akaike information criterion，AIC）值分别下降7.92和7.57，说明路网及其他影响因素对城市活力变化的影响存在空间非稳定性，不同指标对城市活力的影响在空间上存在很大差异，因此对模型进行GWR回归分析有意义。

GWR模型校正后的R^2为0.81，即回归模型涵盖了大约81%的解释变量。路网结构变量中，接近度与城市活力值呈现正相关关系，穿行度与城市活力值总体呈现负相关，但关联性较弱。其根本原因是接近度较高的路网承担了较多与人们日常生活出行相关的交通量，故正向影响路网附近的城市活力值。而从穿行度在空间上的分布差异来看，穿城而过的主干道穿行度较高，更大程度上承担着城市内部和外部的联结作用，对城市内部活力值贡献不大。无论是接近度还是穿行度，对城市活力的影响程度都随着搜索半径的增加而减弱，Tobler[31]提出的地理学第一定律为：任何事物都是与其他事物相关的，只不过相近的事物关联更紧密。从地理加权回归分析结果来看，经济和社会POI的分布对城市活力值影响程度也很显著，娱乐活动中心的位置选择偏向于中心性较强的地理位置，这与接近度较高的区域城市活力原理相似，符合地理学第一定律。

4.2 路网及其他指标系数空间格局分析

4.2.1 路网相关影响因素的空间异质性 回归分析结果显示路网及其他影响因素对城市活力变化的影响存在空间异质性，因此运用路网和其他因素对城市活力的影响逐个进行分析。如图5a~b所示，路网的拓扑结构指标接近度和穿行度对城市活力的影响在东西方向呈现不同格局。接近度从中间向两边发散，相关度缓慢增加但都为正向影响，整体而言对城市中心外围区域促进作用相对明显，对七里河区的正向影响相对较小，这是由于七里河位于城区与郊区的连接处，路网大多汇聚于此，因此接近度对中间部分影响最为微弱。街道和各个县区

表3 OLS和GWR模型回归分析结果

Tab. 3 Overall results of OLS and GWR model

指标	OLS1模型	OLS2模型	GWR1模型	GWR2模型
AIC	510.506197	485.388169	502.588966	477.821506
R^2	0.809864	0.816217	0.834364	0.835411
矫正后R^2	0.798372	0.804033	0.811995	0.814751
Koenker(BP)统计量	0.000012*	0.000430*	–	–
Jarque-Bera	0.057814	0.065231*	–	–
AIC变化值	–	–	−7.917231	−7.566663

注：AIC为赤池信息准则，可以衡量统计模型拟合优良性；R^2为拟合优度。Koenker(BP)用于确定模型的解释变量是否在地理空间和数据空间中都与因变量具有一致的关系；Jarque-Bera为检验数据的偏度和峰度，评价给定数据服从未知均值和方差正态分布的假设是否成立。*表示旁边的系数具有统计学上的显著性，当统计量显著，可以考虑应用GWR模型做回归分析。OLS1模型和GWR1模型被解释变量为工作日城市活力值，OLS2模型和GWR2模型被解释变量为休息日城市活力值。

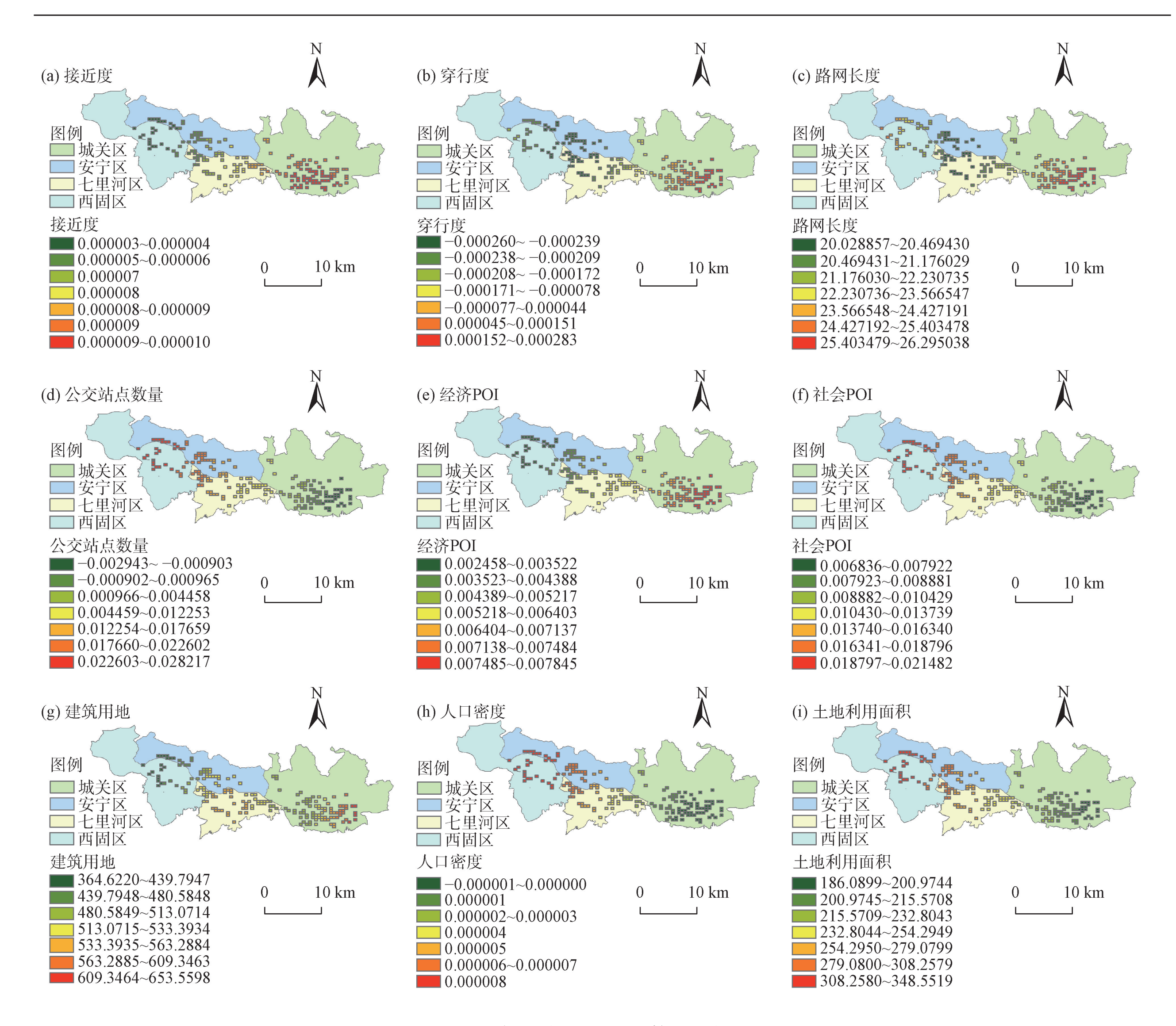


图5 解释变量回归系数空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of regression coefficients of explanatory variables

的连接处接近度相对较高,对城市活力带动效应较为明显,但受地理阻隔黄河两岸城市活力值差距较大。穿行度由西向东逐渐增大。城关区为兰州市主城区,承载着最多的商业和娱乐活动,较大的交通量带来了更高的城市活力,因此穿行度对城关区的城市活力有着较强正向影响。穿行度负向影响最强的区域体现在七里河区和安宁区,大量高校坐落于此,又因为兰州市带状城市的特点,路网也汇聚于此,活力主要依赖本区的交通流,过多主干交通流的穿过在一定程度上加重了交通负担,抑制区域内的人流、车辆流动。综上,不同区域城市活力的提高需要分别讨论,如对于城关区,较高的穿行度和接近度都会为城市活力提供积极影响,而对于安宁区和七里河区,需要提升路网的接近度,使通向本区的难度降低,在现有穿城而过的路网基础上,修建支路,加强区域路网的拓扑整合能力和中心性。

如图5c~d所示,路网长度和公交站点数量对研究区内的城市活力正向作用显著,整体都呈现出由东向西逐渐增强的趋势,在城关区稍有差别,城区边缘路网长度和公交站点数量相关性也稍有增强,最低值出现在城关区和七里河区的交界处,越远离城市中心位置的城市活力越依赖交通的便利性,尤其是公共出行方式,路网长度也在一定意义上提升了到达相应区域的可能性,因此路网长度和公交站点数量空间系数格局整体呈现左高右低的特征。

4.2.2 其他影响因素空间系数格局 如图5e~i,经济类POI与社会类POI系数空间格局恰好相反,经济类POI回归系数由东向西逐渐减弱,而社会类逐渐

增强。城关区城市活力主要依赖于经济类POI，餐饮美食、购物消费等娱乐场所对城市活力的提高有明显的促进作用，而其他城区，偏向社会生活和基础设施的其他场所存在对于提升城市活力有着更为关键的作用。说明在城市活力相对较低的区域，社会服务设施可以为城市活力打下基础，在这个阶段经济类POI的存在对城市活力的作用并不是很显著。建筑用地和人口密度空间回归系数分布格局在东西方向上趋势相反，代表着建筑面积没有在提升城市活力方面发挥作用，人口的分布并未随着建筑面积的增大而改变，因此合理规划建筑类别，也是活力提升的途径之一。土地利用面积空间回归系数均为正向，呈现中间低两边高的格局，说明七里河区和安宁区的土地利用状况对于城市活力的影响较弱，合理的土地利用有助于缩小其与城关区城市活力的差距。

5 结 论

本文量化百度实时热力图以表征城市活力，通过对兰州市主城区路网形态及其他变量和城市活力进行地理加权回归分析，证明路网形态影响城市活力的分布，并且其对城市活力的影响存在明显的空间异质性，得出以下主要结论：

（1）兰州市城市活力的变化规律与路网接近度呈现高度一致性，路网拓扑结构指标和城市活力分布总体均呈发散式，沿着路网向外逐渐降低。

（2）街道和城区的衔接处路网密度较大，接近度相对较高，对城市活力带动效应较为明显，但黄河两岸受黄河阻隔，桥梁数量有限，所起到的联通作用较弱，所以城市桥梁的合理建设布局对提升黄河两岸城市活力总体水平，缩小黄河两岸发展差距具有重要意义。

（3）较高的穿行度和接近度对城市活力有促进作用，较为密集的路网往往会吸引更多的商业和服务活动，贯穿全程的路网联结了不同城区之间的日常活动，带来更大的市场潜力和更多的经济机会。对于距离城市中心较远的位置，支路的合理配置对城市活力的提升非常关键。

（4）与其他城市相比，兰州市独特的带状形态决定了其穿行度对于提升整体城市活力作用较弱，穿城而过的路网虽联通了各个县区，在城市内部无法充分发挥更高效的联通性，但良好的穿行度必将使兰州市在兰西城市群建设中更大效率的发挥联通作用。

参考文献（References）

[1] Row A T, Jacobs J. The death and life of great American cities[J]. The Yale Law Journal, 1962, 71(8): 1597, doi: 10.2307/794509.

[2] Lynch K. A theory of good city form[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1981.

[3] Montgomery J. Editorial urban vitality and the culture of cities[J]. Planning Practice & Research, 1995, 10(2): 101–110.

[4] Montgomery J. Making a city: Urbanity, vitality and urban design [J]. Journal of Urban Design, 1998, 3(1): 93–116.

[5] Sung H, Lee S, Cheon S H. Operationalizing Jane Jacobs's urban design theory: Empirical verification from the great city of Seoul, Korea[J]. Journal of Planning Education and Research, 2015, 35 (2): 117–130.

[6] Still B, Simmonds D. Parking restraint policy and urban vitality[J]. Transport Reviews, 2000, 20(3): 291–316.

[7] Lopes M N, Camanho A S. Public green space use and consequences on urban vitality: An assessment of European cities[J]. Social Indicators Research, 2013, 113(3): 751–767.

[8] Ye Y, Li D, Liu X J. How block density and typology affect urban vitality: An exploratory analysis in Shenzhen, China[J]. Urban Geography, 2018, 39(4): 631–652.

[9] Chion M. Producing urban vitality: The case of dance in San Francisco[J]. Urban Geography, 2009, 30(4): 416–439.

[10] 金延杰. 中国城市经济活力评价[J]. 地理科学, 2007, 27(1): 9–16. [Jin Yanjie. Study on urban economic vitality index in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(1): 9–16.]

[11] 刘黎, 徐逸伦, 江善虎, 等. 基于模糊物元模型的城市活力评价[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 73–77. [Liu Li, Xu Yilun, Jiang Shanhu, et al. Evaluation of urban vitality based on fuzzy matter-element model[J]. Geography and Geo-information Science, 2010, 26(1): 73–77.]

[12] 汪胜兰, 李丁, 冶小梅, 等. 城市活力的模糊综合评价研究——以湖北主要城市为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(3): 440–445, 449. [Wang Shenglan, Li Ding, Ye Xiaomei, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on the urban vitality: A case of the main cities in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences Edition), 2013, 47(3): 440–445, 449.]

[13] 杨朗, 张晓明, 周丽娜. 大数据视角下广州老城活力时空特征及影响机制[J]. 城市学刊, 2020, 41(4): 40–46. [Yang Lang, Zhang Xiaoming, Zhou Lina. Analysis of the temporal and spatial characteristics of vitality and influencing mechanism from the perspective of big data: Case study of Guangzhou old town[J]. Journal of Urban Studies, 2020, 41(4): 40–46.]

[14] 唐璐, 许捍卫, 丁彦文. 融合多源地理大数据的城市街区综合活

力评价[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(8): 1575-1588. [Tang Lu, Xu Hanwei, Ding Yanwen. Comprehensive vitality evaluation of urban blocks based on multi-source geographic big data[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(8): 1575-1588.]

[15] Guo X, Chen H F, Yang X P. An evaluation of street dynamic vitality and its influential factors based on multi-source big data[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2021, 10(3): 143, doi: 10.3390/land11050646.

[16] Fang C L, He S W, Wang L. Spatial characterization of urban vitality and the association with various street network metrics from the multi-scalar perspective[J]. Frontiers in Public Health, 2021, 9: 677910, doi: 10.3389/fpubh.2021.677910.

[17] 王娜, 吴健生, 李胜, 等. 基于多源数据的城市活力空间特征及建成环境对其影响机制研究——以深圳市为例[J]. 热带地理, 2021, 41(6): 1280-1291. [Wang Na, Wu Jiansheng, Li Sheng, et al. Spatial features of urban vitality and the impact of built environment on them based on multi-source data: A case study of Shenzhen[J]. Tropical Geography, 2021, 41(6): 1280-1291.]

[18] 毛炜圣, 钟业喜. 长江中游城市群城市活力水平空间格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1): 86-95. [Mao Weisheng, Zhong Yexi. Spatial pattern and influencing factors of urban vitality in the middle reaches of the Yangtze River[J]. World Regional Studies, 2020, 29(1): 86-95.]

[19] 叶宇, 庄宇. 新区空间形态与活力的演化假说: 基于街道可达性、建筑密度和形态以及功能混合度的整合分析[J]. 国际城市规划, 2017, 32(2): 43-49. [Ye Yu, Zhuang Yu. A hypothesis of urban morphogenesis and urban vitality in newly built-up areas: Analyses based on street accessibility, building density and functional mixture[J]. Urban Planning International, 2017, 32(2): 43-49.]

[20] 吴莞姝, 党煜婷, 赵凯. 基于多维感知的城市活力空间特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(10): 1867-1882. [Wu Wanshu, Dang Yuting, Zhao Kai. Spatial characteristics of urban vitality based on multi-dimensional perception[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(10): 1867-1882.]

[21] 朱婷婷, 涂伟, 乐阳, 等. 利用地理标签数据感知城市活力[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 365-374. [Zhu Tingting, Tu Wei, Le Yang, et al. Sensing urban vibrancy using geo-tagged data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 365-374.]

[22] Liu H, Li X M. Understanding the driving factors for urban human settlement vitality at street level: A case study of Dalian, China[J]. Land, 2022, 11(5): 646, doi: 10.3390/land11050646.

[23] 高玉祥, 董晓峰, 梁颖. 基于GIS的宁夏路网空间特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 268-276. [Gao Yuxiang, Dong Xiaofeng, Liang Ying. Spatial features of road networks in Ningxia based on GIS[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 268-276.]

[24] 梁军, 彭嘉恒. 考虑路网拓扑时变的交通拥堵自适应预测方法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(9): 157-170. [Liang Jun, Peng Jiaheng. Research on an adaptive traffic congestion prediction method considering a time-varying network topology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 157-170.]

[25] Li J G, Li J W, Yuan Y Z, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and mechanism analysis of urban population density: A case of Xi'an, Shaanxi, China[J]. Cities, 2019, 86: 62-70.

[26] Li X, Qian Y S, Zeng J W, et al. The influence of strip-city street network structure on spatial vitality: Case studies in Lanzhou, China[J]. Land, 2021, 10(11): 1107, doi: 10.3390/land10111107.

[27] 姜栋, 赵文吉, 王艳慧, 等. 地理加权回归的城市道路时空运行态势空间网格计算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 48(6): 988-996. [Jiang Dong, Zhao Wenji, Wang Yanhui, et al. Analysis of urban road spatiotemporal situation by geographically weighted regression with spatial grid computing method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 48(6): 988-996.]

[28] 周璐瑶. 基于手机信令数据的武汉市城市活力与影响因素分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2020. [Zhou Luyao. Analysis of urban vitality and influencing factors based on mobile phone signaling data in Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.]

[29] 董磊磊, 潘竟虎, 王卫国, 等. 基于遥感和GWR的兰州中心城区夏季热场格局及与土地覆盖的关系[J]. 土壤, 2018, 50(2): 404-413. [Dong Leilei, Pan Jinghu, Wang Weiguo, et al. Spatiotemporal pattern of summer thermal field and its relationship with land cover in Lanzhou based on RS and GWR[J]. Soils, 2018, 50(2): 404-413.]

[30] 柏荷, 明義森, 刘启航, 等. 基于MGWR模型的黄河流域GPM卫星降水数据降尺度研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1052-1062. [Bai He, Ming Yisen, Liu Qihang, et al. Downscaling of GPM satellite precipitation data in the Yellow River Basin based on MGWR mode[J]. Arid Land Geography 2023, 46(7): 1052-1062.]

[31] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46: 234-240.

Influence of road network form on urban vitality in the main urban area of Lanzhou City

LU Bei[1], ZENG Junwei[1], QIAN Yongsheng[1], WEI Xuting[1],
YANG Min'an[2], LI Haijun[1]
(1. School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Flexible transportation is conducive to enhancing urban vitality and thus drives the high-quality development of cities. In order to characterize urban vitality in a more practical way, the impact of its influencing factors such as road network morphology, the spatial heterogeneity of these factors, and its mechanisms of change must be explored to provide a basis for future planning and lay a theoretical foundation for further urban vitality improvement. This paper uses the raster calculator in ArcGIS to quantify the city of Baidu's population heat map and characterize its urban vitality. Based on road network morphology and geographic big data, sDNA is used to calculate the topological structure index of the road network, and the GWR model is used to analyze the spatial heterogeneity of the impact of road network morphology and other factors on urban vitality. sDNA emphasizes the integration and coordination of the urban transportation network. It can better reflect actual traffic location and has advantages in the analysis of multi-level traffic networks. The GWR model can explore the spatial heterogeneity of the impact of urban vitality influencing factors. The results demonstrate the following. (1) Urban vitality gradually decreases as the road network spreads outward, and the change rule is highly consistent with the network quantity penalized by euclidean distace (NQPDE). (2) Two phase betweenness has little effect on improving the urban vitality of Lanzhou City, but it plays a key node and connectivity role in the Lanzhou-Xining urban agglomeration. (3) The NQPDE value of the intersection and edge of the street and the city are high, but the urban vitality values on both sides of the Yellow River are markedly different due to geographical restrictions. For areas with relatively low urban vitality, the key to enhancing vitality lies in the establishment of basic service facilities and the rational allocation of branches. The rational planning of the bridges connecting the two sides will bring new changes to the urban vitality of Lanzhou City. In summary, areas with rational network layouts tend to attract more business and service activities, have greater market potential, and more economic opportunities. The research results can help clarify the influence of road network form on urban vitality, provide a reference for improving urban vitality in the main urban area of Lanzhou City, and help promote and improve urban vitality in general.

Key words: road network form; urban vitality; road network topology; geographically weighted regression; spatial design network analysis; spatial heterogeneity